

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

³⁶Cl 断代法应用于青藏高原末次快速隆升的构造事件研究

任收麦^{1,2)}, 葛肖虹³⁾, 杨振宇¹⁾, 林源贤⁴⁾, 胡勇⁵⁾, 刘永江³⁾, Johann GENSER⁶⁾, Andrea B. RIESER⁶⁾

- 1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081; 2) 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京, 100034; 3) 吉林大学地球科学学院, 长春, 130061; 4) 天津地质矿产研究所, 300170; 5) 青海油田分公司勘探开发研究院, 敦煌, 736202; 6) Department of Geography and Geology, University of Salzburg, Austria

内容提要:青藏高原的形成与隆升是多期次的, 尤其早更新世晚期的快速隆升对全球气候变化、我国西部盆地地貌形成与荒漠化的出现有着重大影响, 这已成为近年地学研究的热点问题。通过对高原东北缘—柴达木盆地西部地区角度不整合面上下地层中红色泥岩³⁶Cl 断代法定年, 首次测定该事件发生在早更新世晚期至中更新世(1.54~0.28 Ma B. P.)之间。结合敦煌盆地同时代地层(0.837 Ma B. P. 和 1.142 Ma B. P.)的低角度掀斜现象, 以及前人在塔里木盆地、柴达木盆地、吐鲁番—哈密盆地、酒西盆地的研究结果, 认为早更新世晚期, 受青藏高原快速隆升北向挤压作用的影响, 我国西北地区发生了一次重要的构造事件, 造成大范围的挤压变形与山脉隆升, 这对我国西北地区构造格架的最终形成和晚期油气运移成藏具有重要意义。

关键词:柴达木盆地; 早更新世; ³⁶Cl 断代法定年; 构造事件

青藏高原的形成和隆升, 是新生代全球构造演化中的一个重大事件, 它对中亚乃至全球环境的影响, 是地学研究中一个倍受关注的科学问题。目前学术界认识比较统一的是, 青藏高原的隆升是印度板块与欧亚大陆新生代陆-陆碰撞的结果, 这一隆升过程是多阶段和多层次的不均匀隆升(车自成等, 1986; 李廷栋, 1995; Li Tingdong, 1996; 钟大赉等, 1996; Chung Sunlin et al., 1998; 王成善等, 1998a; 肖序常等, 1998; 傅容珊等, 1999; 潘裕生, 1999; 赖绍聪等, 2000; Tapponnier et al., 2001; 黎敦朋等, 2004; 任收麦等, 2004), 但对于隆升过程中哪期运动占据主导地位则存在争议。一种观点认为渐新世—中新世时高原发生强烈隆升高原已经形成, 主要根据渐新世高原山顶面的存在(高红山等, 2004)、高喜马拉雅片体中的夕线石长期变质变形作用(32~17 Ma B. P.)(Searle et al., 2003)、河西走廊盆地中最老新生代地层火烧沟组为山麓—河湖相沉积, 与上下地层均为不整合接触的高精度磁学测年结果(40.2 Ma B. P. 和 33.4 Ma B. P.)(戴霜等, 2005);

可可西里盆地烽火山群和亚西错群地层晚渐新世的强烈挤压变形(Liu Zhifei et al., 2001); 祁连山、昆仑山少量的⁴⁰Ar/³⁹Ar 和裂变径迹年龄认为渐新世—中新世期间, 高原北部发生快速隆升剥蚀(Liu Yongjiang et al., 2003; Wang Fei et al., 2004)以及东、西昆仑山上花岗岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学所反映的东、西昆仑分别在 30 Ma B. P.、20 Ma B. P. 之前经历了重要的隆升剥蚀事件的结论(Mock et al., 1999), 认为当时(25 Ma B. P. ~17 Ma B. P.)高原隆升达到的高度和宽度, 足以改变气候环流形势, 使得高原东北边缘临夏地区的植被从疏林草原变为森林(施雅风等, 1998)。也有部分学者注意到青藏高原东南地区大的河流快速切割的时间发生在 9~13 Ma B. P. (Clark et al., 2005)、沿阿尔金断裂 13.7 Ma B. P. 山前磨拉石沉积的发育(Sun Jimin et al., 2005), 强调了中新世时期青藏高原的剧烈隆升, 这不仅在喜马拉雅造山带沉积(王成善等, 1998b)、孟加拉海扇沉积物中碎屑钾长石和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学分析结果有所响应(Copeland et al., 1990),

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40272099, 40572135)、科技部重大基础研究前期研究专项(编号 2002CCA05100)和博士点基金项目(编号 20040183055)联合资助成果。

收稿日期: 2006-03-06; 改回日期: 2006-05-22; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 任收麦, 男, 1973年生。博士, 副研究员, 构造地质学专业。通讯地址: 100034, 北京市阜内大街88号, 油气资源战略研究中心; 电话: 010-66558864; 传真: 010-66558867; Email: realshaw@vip.sina.com。

还引起了嘉璃断裂中新世(18~12 Ma B. P.) 的重新活动(Lee Haoyang et al., 2003)。还有学者认为, 青藏高原在印度板块和欧亚大陆碰撞初期并没有发生大幅度的隆升, 新近纪主夷平面(约 3.6 Ma B. P.) 的形成代表了主要的隆升和夷平(高红山等, 2004), 认为 3.6 Ma B. P. 前主夷平面开始大规模解体, 这标志着青藏高原强烈抬升的开始(潘保田等, 2004), 这种认识得到一些证据的支持, 如新疆叶城剖面西域砾岩磁性地层学年龄(沉积时代为晚上新世至早更新世, 反映此时期高原北部的强烈隆起和剥蚀)(Zheng Hongbo et al., 2000; 郑洪波等, 2002)、黄土高原典型剖面磁性地层学年代研究结果(上新世青藏高原隆升)(Qiang Xiaoke et al., 2001)、共和—贵德盆地 3.2 Ma B. P. 沉积速率的突然增强(Fang Xiaomin et al., 2005a)以及高原北部库木库里上新世磨拉石建造的存在(黎敦朋等, 2004)。而更多的学者则认为早更新世末期一中更新世青藏高原才隆升到现今的高度, 无论从青藏高原北缘区域性分布的西域砾岩和戈壁砾岩所代表的构造环境(Liu Tungsheng et al., 1996)、库木库里盆地早更新世巨厚磨拉石建造的出现(黎敦朋等, 2004)、塔里木黄土沉积、喜马拉雅山和南亚海扇的年龄资料(Fort, 1996)、以及更新世之后西部干旱条件的出现(王建等, 2002), 还是区域性角度不整合的发育(黄汲清等, 1980; 葛肖虹等, 2004)、昆仑山垭口地区早更新世沉积环境的变迁(Wu Yongqiu et al., 2001)、高原中更新世之后冰盖的发育(Zheng B et al., 1998)、古岩溶裂变径迹年龄数据(崔之久等, 1996)、西宁—互助地区更新世 1.2 Ma B. P. 以来河流下切加剧及湟水在 1.55~1.2 Ma B. P. 之间的水系格局的调整(鹿化煜等, 2004)等证据都说明了这一点。如何评价这些分歧, 包括如何理解高原隆升、北向推挤及对我国西部构造格架的影响之间的关系, 都是有待进一步探讨的问题。

作为青藏高原东北部的内陆盆地, 柴达木盆地构造形成的时期和期次也一直是西部石油地质工作者十分关注的问题。早在上个世纪 50 年代, 人们已经发现柴达木盆地卷入第三系褶皱的最新地层是“老第四纪地层”(孙殿卿等, 1958), 当时被称为“巴龙马海岩组”, 不整合其上的砾岩称为“老洪积砾岩”(朱允铸等, 1994); 70~80 年代青海石油管理局把“巴龙马海岩组”改称为“七个泉组”, 时代笼统定为早一中更新世(Q_{1-2}), 而“老洪积砾岩”改称为“柴达木组”时代定为晚更新世(Q_3), 并确认柴达木盆地

在“柴达木组”(Q_3)与“七个泉组”(Q_{1-2})、“七个泉组”(Q_{1-2})与下覆狮子沟组(N_2)之间存在两个不整合, 代表两期构造运动(杨藩等, 1992), 上述认识在青海油田一直延续至今。但是, 在柴达木盆地由于界定构造事件的角度不整合面上上下下都是一套砂砾岩层, 长期以来难于获得准确的同位素年龄数据, 对这两期构造运动的时间及其对盆地构造的影响一直存在着争议。本次研究利用 ^{36}Cl 断代法定年技术, 通过对柴达木盆地西部沟口沟地区角度不整合接触面上、下地层中红色泥岩测年, 首次获得了柴达木盆地关于后一事件的定量数据, 并初步探讨了青藏高原隆升、北向推挤、构造定型与油气藏赋存的关系。

1 地质背景及样品采集

柴达木盆地位于青藏高原北缘, 西北、南部、北部边界分别为阿尔金山、东昆仑山和祁连山, 新生代期间, 其形成和演化受阿尔金左行走滑断裂系、昆仑逆冲断裂系、祁连山南向逆冲多重作用的影响(图版 I 上图)。

研究区之一位于阿尔金断裂中部南侧的柴达木盆地西部地区(图版 I a), 另一研究区位于断裂东北部北侧的敦煌盆地边缘(图版 I b)。柴达木盆地西部地区地表构造复杂, 发育有受阿尔金断裂的主体部分牵引的系列背斜构造带, 它们靠近阿尔金山前仰起, 地层以前中生界为主, 而向盆地内部倾伏, 主要出露新生界, 从始新统到更新统, 地层层组依次为下干柴沟组、上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组、七个泉组。在干柴沟南侧的沟口沟的沟口($N38^{\circ}21.073'$, $E90^{\circ}46.369'$), 发育高角度不整合接触关系, 接触面上部地层产状近水平, 为灰色较松散的砂砾岩, 其中发育长约 2~3m、厚约 30cm 的砖红色泥岩透镜体, 青海油田曾认为属上更新统(图版 I a 照片上部)。下部砂砾岩层从颜色、成分和上部地层接近, 但胶结程度明显要好于上部地层, 成层性及韵律性良好, 其中发育约 1~2m, 厚约 40cm 的棕红色泥岩透镜体, 地层产状 $245^{\circ}\angle 48^{\circ}$ (倾向/倾角, 下同), 青海油田认定为七个泉组(图版 I a 照片下部)。在敦煌盆地南侧紧邻阿尔金山的沙山沟剖面($N 38^{\circ}40.175'$, $E 94^{\circ}21.664'$), 发育地层为更新世棕红色粉砂岩、砂岩互层, 胶结程度较差, 地层产状为 $50^{\circ}\angle 4^{\circ}$ 。

样品采集严格遵循新鲜、深红色泥岩、每样重 2kg、密封的原则进行, 运输途中不得置于潮湿或高温处(低于 60°C)。野外分别在柴西地区角度不整合

接触面上、下地层(图版 I a 左侧照片)、敦煌盆地沙山沟剖面(图版 I b 右侧照片)按要求采取两组泥岩样品。

2 样品制备及测试

2.1 ^{36}Cl 断代法测年原理

自然界中存在两种成因的 ^{36}Cl 。一种产于地下岩石圈,主要由 U 和 Th 衰变系列的 α 粒子引起的次级中子同 ^{36}Cl 的反应产生和宇宙射线的高能粒子引起地表面的 K, Ca, Ar 的散裂反应产生,称之为非宇宙成因 ^{36}Cl 。另一种 ^{36}Cl 产自大气平流层,主要由宇宙射线的高能粒子引起大气平流层的 ^{40}Ar 散裂反应产生,称之为宇宙成因的 ^{36}Cl 。宇宙成因的 ^{36}Cl 属宇宙核素,是年轻沉积物(小于 3.0Ma B. P.) 沉积年龄测定的对象之一(Phillips et al., 1986, 1990)。具体测试方法和年龄计算原理见下文。

2.2 样品的制备及测试

野外采集的年轻沉积物样品,在无硫酸、无盐酸存放的室内自然晾干、过筛,取小于 200 目的沉积颗粒作沉积年龄的测定。样品的宇宙成因 ^{36}Cl 放射性比度的测定是由超灵敏质谱计(AMS)来完成的,要求样品制成 AgCl 固体形式。为了排除 ^{36}Cl 的同位异质素 ^{36}S 的干扰,制出的 AgCl 必须充分保证 S 的成分降低到定量清除的级别。因此,制样场所和使用的试剂、用水都有严格的规范要求,制出的 AgCl 的质量必须得到 AMS 认可。样品 AgCl 的制备在天津地质矿产研究所百级空气净化(每立方英尺内 0.5um 的尘埃颗粒少于 100 个)实验室中进行(林源贤等, 2002; Jiang Songsheng et al., 2004)。使用的样品量在 10~15g 左右。样品置于石英烧杯中,用 0.1N 的 HNO_3 30ml 左右泡浸 24h,中间搅动数次,最后用超声波振荡器振荡 20min,沉淀后的清液为多种正负离子共存的样品泡浸溶液,为了有效地保存 Cl^- (和宇宙成因 ^{36}Cl),需进行多道净化工艺流程:消除 PO_4^{3-} 和 ASO_4^{3-} ; 根除 SO_4^{2-} ; 根除全部金属正离子; 样品 Cl 转化为 NaCl; 样品 NaCl 加热除去 I^- 、 Br^- ; 样品 NaCl 和 AgNO_3 作用得 AgCl; 样品 AgCl 加温除去单质 S,最后得到纯净的 AgCl 固体样。

样品 ^{36}Cl 放射性比度($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$)一般为 10^{-13} ~ 10^{-15} 数量级,只有超灵敏质谱计才能测定。本次样品的 ^{36}Cl 放射性比度测定由中国原子能科学研究院核物理研究所北京串列式加速器质谱计进行。

3 ^{36}Cl 断代法定年结果

^{36}Cl 的放射性衰变遵循放射性衰变定律,其半

衰期为 $T_{1/2} = 0.305\text{Ma}$,但在衰变过程中只放出 γ 射线,没有子体同位素产出。若将沉积物样品现在仍存活着的 ^{36}Cl 的放射性比度($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$)记为 I ,而沉积封闭时样品的 ^{36}Cl 放射性比度记为 I_0 ,根据放射性衰变定律 $I = I_0 e^{-\lambda t}$, λ 与 ^{36}Cl 的半衰期 $T_{1/2}$ ($= 0.305\text{Ma}$)的关系为

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0.693147 / 0.305 = 2.27(\text{Ma})^{-1}$$

则有:

$$t = 1 / \lambda \ln(I / I_0) = 0.44 \ln(I / I_0) (\text{Ma}) \quad (1)$$

上式为宇宙成因 ^{36}Cl 沉积年龄计算的基本公式。其中:

I_0 的定值,以 Bentley 等(1986)总结出的地球上不同纬度地区来自大气平流层的 ^{36}Cl 的产率呈似“高斯分布”的规律为依据(Bentley et al., 1986);以太平洋($4^{\circ}18'N$ 、 $161^{\circ}09'E$)无人烟区表面海水 ^{36}Cl 放射性比度实际测定值为基准参考点(林源贤等, 2002);以海水中在 2 亿年以来 Cl^- 的浓度基本衡定的生物地球化学研究成果为背景材料,可以从 ^{36}Cl 的产率规律计算出地球上任何纬度地区宇宙成因 ^{36}Cl 的放射性比度 I_0 。

陆地上方的大气对流层中,由于地下岩石矿物($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$)放气作用导致陆地上空的 ^{40}Ar 浓度很可观,同时该部分的 ^{40}Ar 在对流层中也产生 ^{36}Cl ,导致陆地宇宙成因 ^{36}Cl 的产率高于海洋同纬度上的宇宙成因 ^{36}Cl 的产率。因此,海相沉积和陆相沉积在沉积溶液阶段宇宙成因的 ^{36}Cl 早期放射性比度是不同的。同时,“陆相沉积封闭”时,年轻沉积物吸附的 ^{36}Cl 还包含有采样点由雨水带来的附近海洋蒸发的 ^{36}Cl (大气环流)。目前测定样品仍存活着的 ^{36}Cl 放射性比度 I 值中,仍包含该地点雨水的 ^{36}Cl 经过时间 t 的衰变之后的分量,该分量无法由实验加以剔除,但它在沉积封闭时的原始量是知道的,这个原始量就是现今该地点雨水中的 ^{36}Cl 放射性比度(视为 3.0 Ma B. P. 以来测定),记为 I_L 。

I 、 I_0 和 I_L 是作为陆相测年样品具备的 3 个基本数据,都以 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 表示,其中的 Cl(分母)对任何样品来说是一个衡量。当样品中与地球上 U 衰变相关联的非宇宙成因 ^{36}Cl 可忽略时,陆相 ^{36}Cl 断代法定年公式为:

$$t = 0.44 \ln[(I_0 + I_L) / I] (\text{Ma}) \quad (2)$$

$38^{\circ}N$ — $40^{\circ}N$ 的宇宙成因 ^{36}Cl 的产率在 $59 \sim 60 \text{atom}/\text{m}^2\text{s}$ 之间(表 1)。采样点纬度分别为 $N 38^{\circ} 21'$ 和 $N 38^{\circ} 40'$,线性内插法计算其宇宙成因 ^{36}Cl 的产率分别为 59.175 和 59.335。基准点($4^{\circ}18'N$)宇

宙成因 ^{36}Cl 的产率为 4.20, 实测的 ^{36}Cl 放射性比度 I_0 为 96.60。产率与放射性比度之间成正比关系 (Zreda et al., 1991), 则有柴西地区和敦煌盆地边缘的样品 ^{36}Cl 早期放射性比度 I_0 分别为 1361.025 和 1364.705。采样位置附近雨水的 I_L 引用同纬度地区雨水的 ^{36}Cl 放射性比度实测值 110 (林源贤等, 2002)。

表 1 大陆地区实测 ^{36}Cl 产率与纬度关系

Table 1 The linkage between produce rate of ^{36}Cl of continental zone and sampling latitude

测试样品位置	地理纬度	产率 (atom/m ² s)	参考文献
美国印地安那州	40°N	60	Knies et al., 1994
美国马里兰	38°N	59	Helz et al., 1995
澳大利亚东南	34°~37°N	31	Bird et al., 1991
格陵兰	65°N	24	Zreda et al., 1991

经测定, 各个样品的 $I(^{36}\text{Cl}/\text{Cl})$ 和据式 (2) 计算出相应的沉积年龄见表 2。

表 2 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 同位素年龄测试结果

Table 2 Results of the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ dating

样品号	采样位置		$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ($\times 10^{-15}$)	年龄 (Ma)
沟-1	沟口沟 上部地层	N 38°21.073'	7600±870	0.277±0.051
		E 90°46.369'		
沟-2	沟口沟 下部地层	N 38°21.198'	45±7	1.534±0.069
		E 90°46.491'		
沙-1	敦煌盆地 沙山沟	N 38°40.175'	220±33	0.837±0.067
		E 94°21.664'		
沙-2	敦煌盆地 沙山沟	N 38°40.175'	110±17	1.142±0.069
		E 94°21.664'		

由于我国西北地区中、下更新统之间的不整合面上、下都是一套砂砾岩层, 长期以来难于获得准确的同位素年龄数据, 1~0.8 Ma B. P. 成为我国西部地区目前年轻地质体系测年方法的一个盲区。 ^{36}Cl 断代法测年方法恰好适用于此时间段, 但其应用于陆相沉积地层沉积年龄尚无先例, 因此这一方法的可靠性一直存在争议, 限于文章篇幅, 另文论述, 但利用磁年代学方法 (Zhu Rixiang et al., 2001) 和 ^{36}Cl 断代法技术针对泥河湾盆地湖相地层测试结果的一致性可以说明该方法具有一定的可靠性 (林源贤等, 2002)。

4 结论及讨论

测试结果表明阿尔金山南侧柴西地区角度不整合接触面的时限可界定为 1.534±0.069 Ma B. P. 到 0.277±0.051 Ma B. P. 之间, 地质时代分别为早

更新世和中更新世 (Gradstein et al., 2004)。这说明, 阿尔金山前这次构造事件发生在早更新世晚期—中更新世之间, 前人把这次运动命名为阿尔金运动 (朱允铸等, 1994), 这次运动对柴达木盆地西部地区的构造演化进而对聚油时间的研究具有十分重要的意义。柴达木盆地西部地区由这期构造运动形成的成排成带构造, 主要是一些与逆冲推覆有关的表层滑脱构造, 勘探实践证明表层聚油构造不甚理想, 应把主要目标对准隐伏在这期表层构造之下的更早期构造, 例如在一些地表为向斜构造的部位寻找下部前期宽缓背斜作为可能的靶区 (杨藩书信交流)。阿尔金断裂北侧敦煌盆地沙山沟红层的测试结果 (0.837±0.067 Ma B. P. 和 1.142±0.069 Ma B. P.) 表明, 该地层属于早更新世, 地层产状 (50°/4°) 显示具有由于背向阿尔金断裂低角度掀斜的特征, 可能是阿尔金山这一时期隆升的结果。

从区域上看, 这次构造事件应该是早更新世晚期, 由于印度板块脉冲式向北对欧亚大陆陆内俯冲的结果 (Kapp et al., 2004; 葛肖虹等, 2004), 导致青藏高原内盆地发生挤压隆升、地层褶皱变形。查阅文献, 不难发现此时期更多的证据, 如昆仑山垭口古湖在 1.1 Ma B. P. 由深湖相的淤泥转变为三角洲相的砂砾夹淤泥沉积, 至 0.72 Ma B. P. 时古湖消失, 沉积变形, 随后出现 0.71 Ma B. P. 的山麓冰川沉积 (施雅风等, 1999); 高原北缘山前凹陷河西走廊内存在晚新生代山麓相磨拉石酒泉砾岩层和玉门砾岩角度不整合接触面年龄为 0.93~0.84 Ma B. P. (赵志军等, 2001), 酒泉砾岩的时间序列为 0.84~0.14 Ma B. P. (Fang Xiaomin et al., 2005b); 西昆仑山北部斜坡黄土的形成时间约为 0.88 Ma B. P. (Fang Xiaomin et al., 2002); 柴达木盆地内湖相沉积速率约在 1.1 Ma B. P. 和 0.9 Ma B. P. 之间迅速增加 (Sun Jimin et al., 2000); 高原中部错鄂孔湖泊沉积岩芯沉积特征、粒度、磁化率和地球化学指标等分析表明高原中部 0.8 Ma B. P. 以来存在加速隆升现象 (沈吉等, 2004); 天山地区下更新统下段及其以下的所有新生代地层都普遍地遭到了强烈的褶皱和逆冲断裂作用, 而未遭到变形的中更新统砾岩覆盖于下伏变形地层之上, 形成新生代地层中最重要的角度不整合 (张培震, 2003); 西南天山阿图石—塔拉河背斜形成于 1.4~1.2 Ma B. P. 期间 (Chen Jie et al., 2002) 等等, 可推断此时期是青藏高原形成过程中的又一重要抬升时期, 尤其高原北部这一时期发生了强烈的新构造挤压隆升。

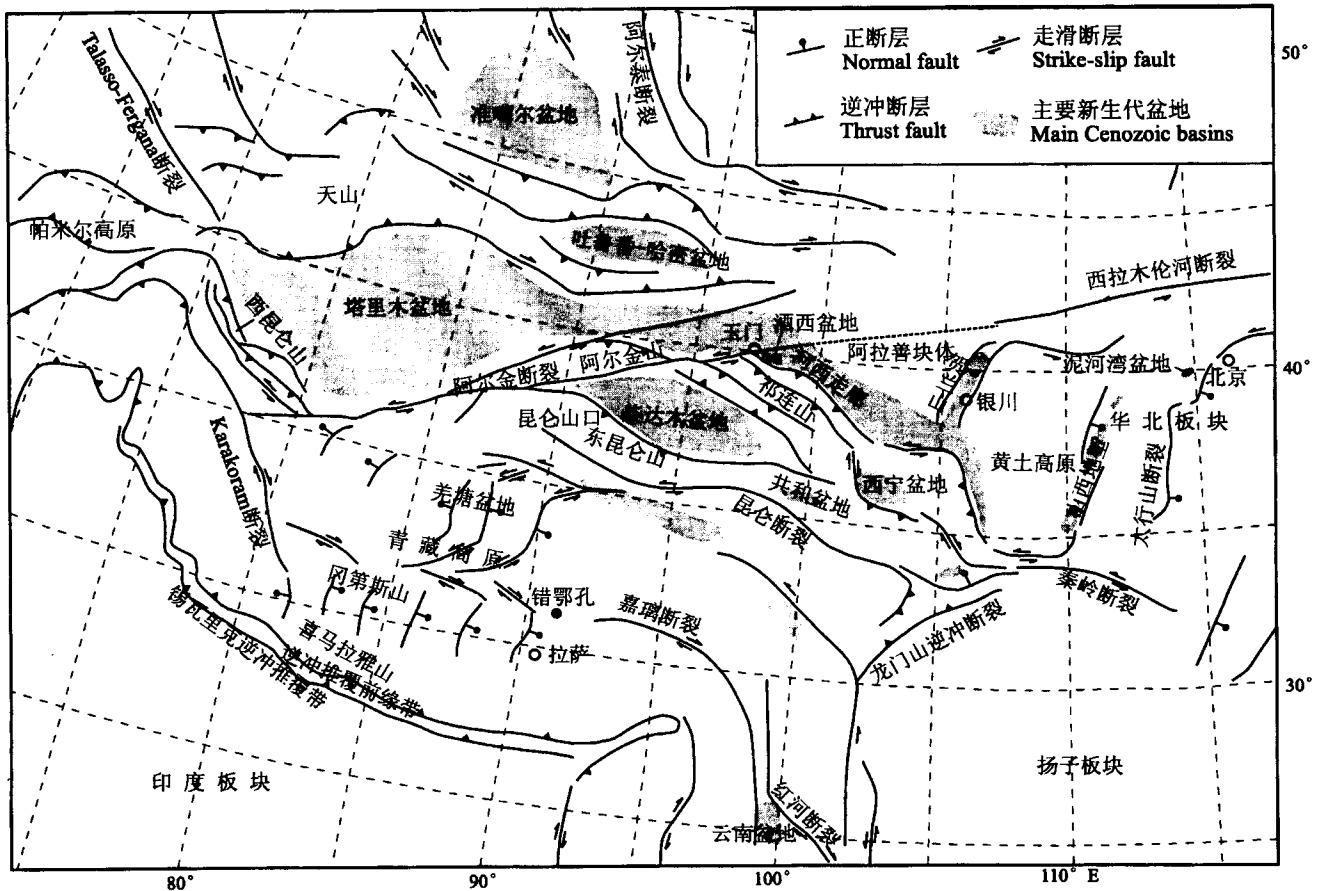


图1 中国西部及邻区构造略图(据 Yin An et al., 2002 修改)

Fig. 1 Simplified map of Western China and its adjacent region (modified from Yin An et al., 2002)

总之,青藏高原早更新世晚期这次新构造挤压隆升事件对中国西部地区的影响巨大,范围可涉及塔里木盆地、吐鲁番-哈密盆地、柴达木盆地、酒西盆地,甚至更远的黄土高原西缘贺兰-六盘山地区(葛肖虹等,2004)(图1),这次事件,不仅使我国北方干旱气候持续加剧和偏北干冷气流持续增强(王跃等,1996),形成了我国西部地区的构造格架,还对西部盆地前期油气成藏的破坏和再次成藏起到一定的影响。当然,这一挤压隆升事件还需要进行区域性的研究和更多同位素测年数据来进一步证实。

致谢: 野外工作得到马志强高级工程师,赵翔、李伟民、袁四化、郭新转等硕士的帮助。两位审稿专家对原稿提出了有益的修改意见,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

车自成. 1986. 从青藏高原的隆起看柴达木盆地的形成与演变. 石油与天然气地质, 7(1): 87~94.
 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 潘保田, 陈怀录. 1996. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学(D辑), 26(4): 378~385.

戴霜, 方小敏, 宋春晖, 高军平, 高东林, 李吉均. 2005. 青藏高原北部的早期隆升. 科学通报, 50(7): 673~683.
 傅容珊, 李力刚, 黄建华, 徐耀民, 常筱华. 1999. 青藏高原隆升过程的三阶段模式. 地球物理学报, 42(5): 609~616.
 高红山, 潘保田, 李吉均, 隋玉柱. 2004. 青藏高原隆升过程与环境变化. 青岛大学学报(工程技术版), 19(4): 40~47.
 葛肖虹, 任收麦, 刘永江, 吴光大, 袁四化. 2004. 青藏高原末次快速隆升与“亚澳”陨击事件. 第四纪研究, 24(1): 67~73.
 黄汲清, 陈炳蔚. 1980. 特提斯-喜马拉雅构造域上新世-第四纪磨拉斯的形成及其与印度板块活动的关系. 见: 地质矿产部书刊编辑部编. 国际交流地质学术论文集——为26届国际地质大会撰写. 北京: 地质出版社, 1~14.
 赖绍聪. 2000. 青藏高原新生代三阶段造山隆升模式: 火成岩岩石学约束. 矿物学报, 20(2): 182~190.
 黎敦朋, 肖爱芳, 李新林, 周小康. 2004. 青藏高原隆升与环境效应. 陕西地质, 22(1): 1~10.
 李廷栋. 1995. 青藏高原隆升的过程和机制. 地球学报, (1): 1~9.
 林源贤, 张慧英. 2002. ³⁶Cl定年技术的研究. 见: 前寒武纪第四纪地质文集编委会, 前寒武纪第四纪地质文集. 北京: 地质出版社, 157~170.
 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 谭红兵, 朱日祥, 马海州, 李珍, 苗晓东, 王先彦. 2004. 最近14Ma青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. 中国科学(D辑), 34(9): 855~864.
 潘保田, 高红山, 李炳元, 李吉均. 2004. 青藏高原层状地貌与高原隆升. 第四纪研究, 24(1): 50~57.

- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆升. 地学前缘, 6(3): 153~163.
- 任收麦, 葛肖虹, 刘永江, 常丽华, 吴光大, 袁四化. 2004. 晚白垩世以来沿阿尔金断裂带的阶段性走滑隆升. 地质通报, 23(9~10): 926~932.
- 沈吉, 吕厚远, 王苏民, 陈诗越, 羊向东, 吴艳宏, 朱照宇. 2004. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部 2.8MaBP 以来环境演化及其对构造事件响应. 中国科学(D辑), 34(4): 359~366.
- 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 1998. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. 中国科学(D辑), 28(3): 263~271.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 姚檀栋, 王苏民, 李世杰, 崔之久, 王富保, 潘保田, 方小敏, 张青松. 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 54(1): 10~20.
- 孙殿卿, 邓乃恭, 吴佳影, 黄汉纯, 徐景文. 1958. 柴达木盆地雁行排列和反“S”形构造所表现的运动程式. 见: 李四光等著, 旋卷和一般扭动构造及地质构造体系符合问题(第二辑). 北京: 科学出版社, 13~36.
- 王成善, 丁学林. 1998a. 青藏高原隆升研究新进展综述. 地球科学进展, 13(6): 526~532.
- 王成善, 丁学林. 1998b. 喜马拉雅的隆升及其沉积反应研究新进展. 地质科技情报, 17(1): 1~7.
- 王建, 黄巧华, 柏春广, 刘泽纯. 2002. 2.5Ma 以来柴达木盆地的气候干湿变化特征及其原因. 地理科学, 22(1): 34~38.
- 王跃, 李森, 王建华, 阎满存. 1996. 试论青藏高原隆升对中国沙漠形成演化的影响. 干旱区研究, 13(2): 20~24.
- 肖序常, 王军. 1998. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述. 地质论评, 44(4): 372~381.
- 杨藩, 马志强, 许同春, 叶素娟. 1992. 柴达木盆地第三纪磁性地层柱. 石油学报, 13(2): 97~101.
- 张培震. 2003. 天山及其前陆盆地的晚新生代构造变形. 科学通报, 48(24): 2499~2500.
- 赵志军, 方小敏, 李吉均, 潘保田, 史正涛, 颜茂都. 2001. 酒泉砾石层的古地磁年龄与青藏高原隆升. 科学通报, 46(14): 1208~1212.
- 郑洪波, 陈惠忠, 靳鹤龄, 李孝泽, 董光荣. 2002. 上新世—早更新世青藏高原北缘隆升的磁性地层学证据. 海洋地质与第四纪地质, 22(2): 57~62.
- 钟大赟, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起及其机制探讨. 中国科学(D辑), 26(4): 289~295.
- 朱允铸, 钟坚华, 李文生. 1994. 柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化. 北京: 地质出版社, 57~72.
- An Zhisheng, Kutzbach John E, Prell Warren L, Porter Stephen C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya—Tibetan plateau since Late Miocene times. Nature, 411: 62~66.
- Bentley H W, Phillips F M, Davis S N, Hebermehl M A, Airey P L, Calf G E, Elmore D, Gove H E, Torgersen T. 1986. Chlorine-36 dating of very old groundwater 1. The Great Artesian Basin, Australia. Water Resour. Res., 22(13): 1991~2001.
- Bird J R, Davie R F, Chivas Allan R, Fifield L K, Ophel T R. 1991. Chlorine-36 production and distribution in Australia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 84(1~4): 299~307. (In: Palaeoenvironments of salt lakes, Edited by Chivas Allan R, De Deckker Patrick. Pressed by Elsevier. Amsterdam, Netherlands. 1991).
- Chen Jie, Burbank D W, Scharer K M, Sobel E, Yin Jinhui, Rubin C, Zhao Ruibin. 2002. Magnetochronology of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tian Shan: rates of Pleistocene folding and thrusting. Earth and Planetary Science Letters, 195: 113~130.
- Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Zhang Yuquan, Xie Yinwen, Li Xianhua, Wang Kuolung, Wang Peiling. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40Myr ago. Nature, 394: 769~773.
- Clark M K, House M A, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. Geology, 33(6): 525~528.
- Copeland P, Harrison T M. 1990. Episodic rapid uplift in the Himalaya revealed by ⁴⁰Ar/³⁹Ar analysis of detrital K-feldspar and muscovite, Bengal Fan. Geology, 18(4): 354~357.
- Fang Xiaomin, Yan Maodu, Van der Voo Rob, Rea David K, Song Chunhui, Pares Josep M, Gao Junping, Nie Junsheng, Dai Shuang. 2005a. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China. GSA Bulletin, 117(9~10): 1208~1225.
- Fang Xiaomin, Zhao Zhijun, Li Jijun, Yan Maodu, Pan Baotian, Song Chunhui, Dai Shuang. 2005b. Magnetostratigraphy of the late Cenozoic Laojunmiao anticline in the northern Qilian Mountains and its implications for the northern Tibetan Plateau uplift. Science in China (Series D), 48(7): 1040~1051.
- Fang Xiaomin, Lu Lianqing, Yang Shengli, Li Jijun, An Zhisheng, Jiang Ping'an, Chen Xiuling. 2002. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China. Science in China (Series D), 45(4): 289~299.
- Fort M. 1996. Late Cenozoic environmental changes and uplift on the northern side of the central Himalaya: a reappraisal from field data. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 120(1~2): 123~145.
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W, Lourens L J. 2004. A new geologic time scale with special reference to Precambrian and Neogene. Episodes, 27(2): 83~100.
- Helz G R, Mignerey A C, Hainsworth L J, Bond C A, Purdy C B. 1995. 36-chloride and stable chloride in confined coastal plain aquifers, southern Maryland. Geological Society of America, 1995 annual meeting—Abstracts with Programs, 27(6): 465.
- Jiang Songsheng, Lin Yuanxian, Zhang Huiying. 2004. Improvement of the sample preparation method for AMS measurement of ³⁶Cl in natural environment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 223~224: 318~322.
- Kapp P, Guynn J H. 2004. Indian punch rifts Tibet. Geology, 32(11): 993~996.
- Knies D L, Elmore D, Sharma P, Vogt S, Li R, Lipshutz M E, Petty G, Ferrel J, Monaghan M C, Fritz S, Agee E. 1994. ⁷Be, ¹⁰Be, and ³⁶Cl in precipitation. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 92: 340.
- Lee Haoyang, Chung Sunlin, Wang Junren, Wen Dajen, Lo Chinghua, Yang Tsanyao F, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Lee Tungyi, Wu Genyao, Ji Jianqing. 2003. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution. Earth and Planetary Science Letters, 205: 185~194.
- Li Tingdong. 1996. The process and mechanism of the rise of the Qinghai—Tibet Plateau. Tectonophysics, 260(1~3): 45~53.
- Liu T, Ding M, Derbyshire E. 1996. Gravel deposits on the margins of the Qinghai—Xizang Plateau, and their environmental significance. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,

- 120; 159~170.
- Liu Yongjiang, Genser J, Ge Xiaohong, Neubauer F, Friedl G, Chang Lihua, Ren Shoumai and Handler R. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age evidence for Altyn Fault tectonic activities in western China. Chinese Science Bulletin, 48(18): 2024~2030.
- Liu Z, Wang C, Yi H. 2001. Evolution and Mass Accumulation of the Cenozoic Hoh Xil Basin, Northern Tibet. Journal of Sedimentary Research, 71(6): 971~984.
- Mock C, Arnaud N O, Cantagrel J M. 1999. An early unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qinghai, NW China). Earth and Planetary Science Letters, 171: 107~122.
- Phillips F M, Leavy B B, Jannik N O, Elmore D, Kubik P W. 1986. The accumulation of cosmogenic Chlorine-36 in Rocks: a method for surface exposure dating. Science, 231: 41~43.
- Phillips F M, Zreda M G, Smith S S, Elmore D, Kubik P W, Sharma P. 1990. Cosmogenic Chlorine-36 chronology for glacial deposits at Bloody Canyon, Eastern Sierra Nevada. Science, 248: 1529~1532.
- Qiang X K, Li Z X, Powell C McA, Zheng H B. 2001. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the East Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 187: 83~93.
- Searle M P, Simpson R L, Law R D, Parrish R R, Waters D J. 2003. The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal—South Tibet. Journal of the Geological Society, 160(3): 345~366.
- Sun J, Zhu R, An Z. 2005. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasse deposits along the Altyn Tagh Fault. Earth and Planetary Science Letters, 235(3~4): 641~653.
- Sun Jimin, Liu Tungsheng. 2000. Stratigraphic evidence for the uplift of the Tibetan Plateau between ~1.1 and ~0.9 myr ago. Quaternary Research, 54: 309~320.
- Synal H A, Beer J, Bonani G, Suter M and Wolfli W. 1990. Atmospheric transport of bomb-produced ^{36}Cl . Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B52: 483~488.
- Tapponnier P, Xu Zhiqin, Françoise R, Meyer Bertrand, Arnaud Nicolas, Wittlinger Gerard, Yang Jingsui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. Science, 294(23): 1670~1677.
- Wang Fei, Lo Chinghua, Li Qi, Yeh Mengwan, Wan Jinglin, Zheng Dewen, Wang Erqi. 2004. Onset timing of significant unroofing around Qaidam basin, northern Tibet, China: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and FT thermochronology on granitoids. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 59~69.
- Wu Yongqiu, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, Ge Daokai, Yin Jiarun, Xu Qinghai, Pang Qiqing. 2001. Quaternary geomorphological evolution of the Kunlun Pass area and uplift of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. Geomorphology, 36: 203~216.
- Yin An, Rumelhart P E, Bulter R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X Q, Wang X F, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh Fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. GSA Bulletin, 10, 1257~1295.
- Zheng B, Rutter N. 1998. On the problem of quaternary glaciations, and the extent and patterns of Pleistocene ice cover in the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. Quaternary International, 45~46: 109~122.
- Zheng Hongbo, P Christopher McAulay, An Zhisheng, Zhou Jie, Dong Guangrong. 2000. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau. Geology, 28(8): 715~718.
- Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, Deng C L, Pan Y X, Guo B, Shi C D, Guo Z T, Yuan B Y, Hou Y M, Huang W W. 2001. Earliest presence of humans in northeast Asia. Nature, 413: 413~417.
- Zreda M G, Phillips F M, Elmore D, Kubik P W, Sharma P, Dorn R I. 1991. Cosmogenic chlorine-36 production rates in terrestrial rocks. Earth and Planetary Science Letters. 105, 94~109.

图 版 说 明

上图—青藏高原区域构造图。

a 图—柴西地区沟口沟口角度不整合接触关系位置图。

b 图—敦煌盆地沙山沟剖面 Q_4 —全新统 (Holocene)。

Q_{3-4} —上更新统一全新统 (Upper Pleistocene to Holocene)。

Q_2 —中更新统 (Middle Pleistocene)。

Q_{2ch} —察尔汗组 (Middle Pleistocene Cha'erhan Formation)。

Q_{1-2q} —七个泉组 (Early—Middle Pleistocene Qigequan Formation)。

Q_{1s} —涩北组 (Early Pleistocene Sebei Formation)。

Q_1 —下更新统 (Lower Pleistocene)。

N_2^1 —狮子沟组 (Pliocene Shizigou Formation)。

N_2^2 —上油砂山组 (Late Miocene Shang Youshashan Formation)。

N_2^3 —下油砂山组 (Early Miocene Xia Youshashan Formation)。

N_1 —上干柴沟组 (Oligocene Shang Ganchaigou Formation)。

E_3 —下干柴沟组 (Eocene Xia Ganchaigou Formation)。

K —犬牙沟组 (Cretaceous Quanyagou Formation)。

J_3 —采石岭组 and 红水沟组 (Late Jurassic Caishiling and Hongshuigou Formations)。

J_{1-2} —小煤沟组 and 大煤沟组 (Early—Middle Xiaomeigou and Dameigou Formations)。

T_{2-3} —中上三叠统 (Middle—Upper Triassic)。

C_2 —上石炭统 (Upper Carboniferous)。

S_{1b} —下志留统巴罗根郭勒组 (Lower Silurian Baluogenguole Formation)。

O_{3tn} —上奥陶统滩间山群 (Upper Ordovician Tanjianshan Group)。

O_{3ts} —上奥陶统铁石达斯群 (Upper Ordovician Tieshidasi Group)。

O_{1w} —下奥陶统吾力沟群 (Lower Ordovician Wuligou Group)。

Pt_{1tx} —塔肯大阪岩群 (Lower Proterozoic Taxidaban Group)。

Pt_{1dk} —达肯大阪岩群 (Lower Proterozoic Dakendaban Group)。

Pt_1 —古元古界 (Paleo Proterozoic)。

γ_4 —晚古生代花岗岩 (Late Paleozoic granite)。

γ_3 —早古生代花岗岩 (Early Paleozoic granite)。

γ_2 —太古宙花岗岩 (Archean granite)。

$\gamma\delta_2$ —太古宙花岗岩闪长岩 (Archean granodiorite)。

δ_4 —晚古生代闪长岩 (Late Paleozoic diorite)。

v_3 —早古生代基性岩 (Early Paleozoic basic rock)。

v_2 —太古宙基性岩 (Archean basic rock)。

Σ_3 —早古生代超基性岩 (Early Paleozoic ultrabasic rock)。

Application of ³⁶Cl-Dating to the Last Rapid Uplift of the Tibet Plateau

REN Shoumai^{1,2)}, GE Xiaohong³⁾, YANG Zhenyu¹⁾, LIN Yuanxian⁴⁾, HU Yong⁵⁾,
LIU Yongjiang³⁾, Johann GENSER⁶⁾, Andrea B. RIESER⁶⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China;* 2) *Strategic Research Center of Oil & Gas Resources, Ministry of Land & Resources, Beijing, 100034, China;* 3) *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin, 130061, China;* 4) *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin, 300170, China;* 5) *Institute of Exploration and Development, Qinghai Oil Field Sub-Company, Dunhuang, Gansu, 736202, China;* 6) *Department of Geography and Geology, University of Salzburg, Austria*

Abstract

The forming and uplifting of the Tibet Plateau are multi-stage, and, the last rapid uplift of the plateau plays especially an important role in global climate change, basin-mountain tectonic formation in western China and appearance of desertification. It becomes a key scientific question recently. Based on field works, we recognized a high-angular unconformity well developed on the southern side of the Altun Mountain in the western Qaidam Basin. Pleistocene strata with slight dip outcrop on the northern side of the Altun Mountain in the southern Dunhuang Basin. Two groups of ³⁶Cl dating samples were collected from mudstone lens of fluvial sediments in the upper and lower unconformity plane in Goukougou in the western Qaidam Basin, and slightly incline mudstone layer in the southern Dunhuang Basin. The samples yield ages of 1.535 Ma in the downside layer and 0.277 Ma in the upside layer of the unconformity in Goukougou, and 1.142 Ma and 0.837 Ma in the southern Duanhuang Basin. In accordance with previous research related to this tectonic event in the Tarim Basin, Turpan—Hami Basin, Western Jiuquan Basin and Qaidam Basin, we argue that an important geological event happened in northwestern China after the Early Pleistocene, which responds evidently to the last rapid compression and uplifting of the northern Tibetan Plateau. Therefore, it is significant to understand the formation of tectonic framework and the late period oil-gas reservoirs in northwestern China.

Key words: Qaidam Basin; Early Pleistocene; ³⁶Cl-dating; geological event

~~~~~



